

秦岭-大别造山带南缘勉略构造带 与勉略缝合带*

张国伟^{①**} 董云鹏^① 赖绍聪^① 郭安林^① 孟庆任^② 刘少峰^③
程顺有^① 姚安平^① 张宗清^④ 裴先治^⑤ 李三忠^⑥

(①)西北大学地质学系, 西安 710069; (②)中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; (③)中国地质大学, 北京 100083;

(④)中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; (⑤)长安大学, 西安 710054; (⑥)中国海洋大学, 青岛 266003)

摘要 秦岭-大别造山带南缘的勉略构造带是中国大陆构造中划分南北、连接东西的重要构造带, 同时还是秦岭-大别造山带中除商丹缝合带外另一条古板块缝合带。多学科综合研究, 确定勉略构造带现今构造几何学结构与运动学特征和恢复重建原秦岭-大别造山带等中央造山系这一板块俯冲碰撞带的形成演化, 不仅对中央造山系, 而且对探讨中国大陆于印支期完成其主体拼合都具有重要意义, 也是探索中国大陆板块构造与大陆动力学的良好天然实验室与研究基地。

关键词 中央造山系 勉略构造带 勉略古缝合带 大陆动力学

秦岭-大别造山带的南缘边界现今呈现为一系列以指向南的逆冲推覆为主的断裂构造带, 简称其为勉略构造带。它东端北侧邻接大别 UHP 岩石剥露区, 并东去为郯庐断裂平移至鲁东, 而西去则跨越青藏高原, 又为阿尔金断裂错移, 接西昆仑至帕米尔构造结, 并继续西延。显然, 它东西向横贯中国大陆中部, 突出表现出以它为主界面, 秦岭-大别等中央造山系从东至西向南作非均一大幅度的推覆运动, 叠置在南侧扬子、松潘等地块北缘之上, 构成一带突出的巨大陆内俯冲带与逆冲推覆带和大陆强构造变形带。如果说中央造山系是中国大陆地质, 乃至地理、生态、环境、气候的南北分界, 则该构造带便是中国大陆构造中分割南北、连接东西的具体断裂构造分界线。以它为界, 南北地质差异明显, 形成巨大的构造交切。而且本文以下的论证还将证明现今的勉略构造带是在先期秦岭-大别板块俯冲碰撞缝合带基础上, 叠加中新世陆内构造而综合形成的复合构造带。因此还表明它原是中国大陆于印支期完成其主体拼合的主要结合带, 在中国大陆的形成与演化中占有重要地位。正因为其形成的复合性, 以下将现今秦岭-大别南缘边界断裂构造带, 因秦岭勉县-略阳段研究最详并具代表性而将其统一简称为秦岭-大别南缘勉略构造带, 而将其先期的俯冲碰撞带称勉略古缝合带, 并统称其为勉略带。显然古缝合带已被改造呈残存状态断续被包含在现今勉略构造带内。无疑, 从现今构造研究, 筛分重建原古缝合带, 进而探讨秦岭-大别造山带的构造格局与形成演化和中国大陆如何完成其主体拼合及其大陆动力学意义, 具有重要意义。

2003-03-10 收稿, 2003-06-16 收修稿稿

* 国家自然科学基金重点资助项目(批准号: 49732080, 40234041)

** E-mail: gwzhang@nwu.edu.cn

秦岭-大别南缘边界断裂构造,前人有很多研究,并有不同的认识^[1-6],但多是对不同区段的单独研究与认识,既很少有统一整体研究论述,更无统一的关于先期古缝合带的研究与认识.故关于勉略古缝合带及其东西的延伸^[7,8],尚有争论^[9],本文即是国家自然科学基金重点项目最新研究成果的综合理论概括与论述.

1 勉略古缝合带的恢复重建

现今勉略构造带从大别-秦岭造山带南缘至东昆仑南缘连续一带,突出组成以南缘边界断层为主推覆界面的弧形波状延展的推覆断裂构造带.依其构造特征可划分为6个区段,自东而西依次为:(i)大别-桐柏南缘区段,简称襄广段;(ii)武当、大巴山弧形区段,简称巴山段;(iii)洋县-勉县-略阳-康县区段,简称勉略段;(iv)康县-文县-玛曲区段,简称康玛段;(v)迭部-玛曲区段;(vi)玛沁-花石峡区段,简称玛沁段(如图1).

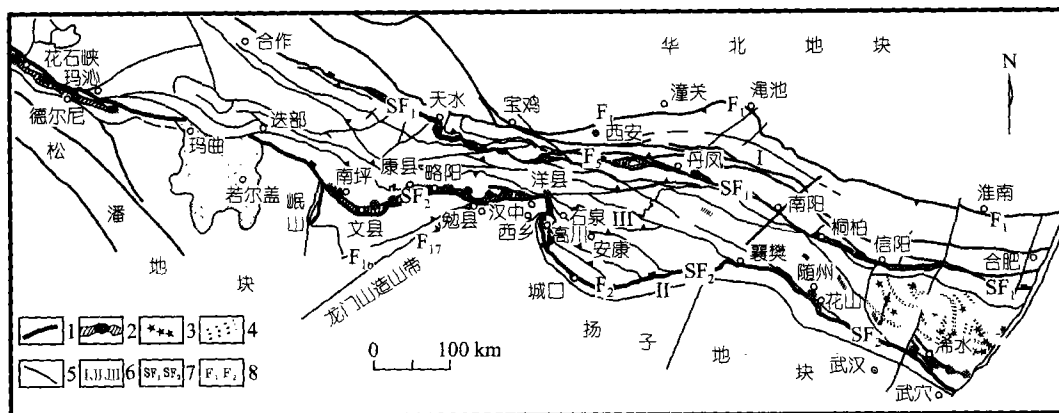


图1 秦岭-大别南缘勉略构造带与勉略古缝合带简图

1. 勉略构造带; 2. 蛇绿岩及相关火山岩; 3. UHP岩石剥露区; 4. 韧性剪切带; 5. 断层; 6. I 示华北地块南缘与北秦岭带; II 示扬子地块北缘; III 示南秦岭; 7. 秦岭-大别造山带商丹缝合带(SF₁), 秦岭勉略缝合带(SF₂); 8. 秦岭-大别北缘边界断裂带(F₁)和南缘边界断裂带(F₂), 即勉略构造带

各区段总体基本组成与构造特征一致,但又差异明显,其中最突出的特征是在现今勉略构造带中,从西至东的不同区段,都突出的保留残存有板块缝合带遗迹.虽然中间有如巴山弧形构造等因后期改造而缺失遗迹的保存,但它总体仍客观可靠地揭示出现今的勉略构造带,原曾是一重要的现已消失,并被多次改造的洋壳消减,板块拼合的缝合带,需要恢复重建.

1.1 勉略古洋盆的确认与恢复

勉略构造带由德尔尼-南坪-康县至勉县,越巴山弧达随州花山,直至大别南缘浠水清水河,断续出露蛇绿岩、洋岛火山岩、岛弧火山岩及初始洋型双峰式火山岩^[10-17].带内蛇绿岩主要见于德尔尼、琵琶寺、庄科、鞍子山、随州花山及大别清水河地区^[11-14,16].岩石组合包括超基性岩(变质洋幔)、堆晶辉长岩、辉绿岩墙群及 MORB 型玄武岩.其中超基性岩多已蚀变为蛇纹岩类,原岩主要是二辉橄榄岩和纯橄岩,其 REE 配分型式为亏损型, $(La/Yb)_N = 0.40 \sim 1.20$, 具正铕异常.辉长岩类变形强烈,具堆晶和辉长-辉绿结构,稀土特征为弱富集型, $(La/Yb)_N = 4.46 \sim 11.73$, $\delta Eu = 0.94 \sim 1.55$, 具弱正铕异常.清水河辉石岩-辉长岩堆晶岩系 Th, U, Ta, Nb,

La 等不相容性较强的元素相对于 Hf, Zr, Sm, Y 等弱不相容元素呈亏损状态, 显示了典型的亏损地幔源特征。辉绿岩多呈岩墙状产出, 在勉略区段三岔子、桥梓沟十分发育, 其 $(La/Yb)_N = 3.09 \sim 6.51$, $\delta Eu = 0.76 \sim 1.06$, 痕量元素配分型式显示了与辉长岩类同源岩浆分异演化的趋势。MORB 型玄武岩是带内蛇绿岩组合的重要组成端元, 以高 TiO_2 , K_2O 和轻稀土亏损(见文献[16]图 2)为典型特征。

洋岛火山岩广泛分布于南坪-康县区段, 可分为洋岛拉斑玄武岩和洋岛碱性玄武岩两类。洋岛拉斑玄武岩类 $(La/Yb)_N$ 介于 $1.85 \sim 5.71$ 之间, δEu 平均 0.94。而洋岛碱性玄武岩 $(La/Yb)_N$ 平均 14.71; δEu 平均 0.93。岩石 N 型 MORB 标准化配分型式以 Ba, Th, Nb, Ta 的较强富集为特征(见文献[16]图 3)。自洋岛拉斑玄武岩→洋岛碱性玄武岩, Ti 的亏损逐渐增强, 而 Ba, Th, Nb, Ta 的富集度却逐渐升高, 反映了洋岛火山作用正常的岩浆演化趋势, 表明它们是典型的洋岛型大洋板内岩浆活动的产物。

岛弧火山岩主要分布于略阳-勉县、洋县-巴山弧地区, 均属亚碱性系列火山岩。略阳三岔子岛弧拉斑玄武岩 $(La/Yb)_N = 6.59$, $\delta Eu = 0.98$ 。而安山岩类 $(La/Yb)_N = 2.78 \sim 13.24$, $\delta Eu = 0.85 \sim 1.02$ 。岩石 $Th > Ta$, $Nb/La < 0.6$, Th/Ta 大多在 $3 \sim 15$ 之间, $Th/Yb = 0.68 \sim 2.74$, $Ta/Yb = 0.10 \sim 0.84$ 。巴山弧岛弧岩浆带以弧内裂隙双峰式火山岩为代表, 玄武岩类 $(La/Yb)_N (2.62 \sim 4.60)$ 和 δEu (平均为 1.03) 表明岩石为轻稀土弱富集型, 且无 Eu 异常。而英安流纹岩类稀土总量较高(平均 186.14×10^{-6}), 其 $(La/Yb)_N$ (平均 6.75) 表明岩石为轻稀土中度富集型。痕量元素以显著的 Nb, Ta 亏损为特征, $Th/Yb-Ta/Yb$ 和 $Ti/Zr-Ti/Y$ 以及 Nb/Th , La/Nb 不活动痕量元素组合特征(见文献[16]图 3), 指示它们生成于岛弧的大地构造环境, 为洋内岛弧弧内裂隙岩浆活动的产物。

略阳黑沟峡和大别南缘兰溪初始洋型双峰式火山岩系主要由玄武岩及少量英安流纹岩组成, 其基性端元均属拉斑系列玄武岩, 仅酸性岩属钙碱系列。该类玄武岩 Nb 与 La 含量大致相等, Nb 未显示出负异常, Ba 也未显示出正异常, 具有高 Th, Pb 异常和低 Rb, K 异常, 表明它们来自 MORB 型地幔源并较少受陆壳混染影响, 而酸性岩则源于具有陆壳特征的源区。玄武岩除了 Th 和 Pb 外, 其他痕量元素大致与 N 型 MORB 类似, 而普遍低于 OIB, 且具有扁平的 REE 模型, 因而应属 MORB 型, 而不是 OIB 和岛弧型, 说明裂谷已拉张成洋盆, 初始洋壳已开始形成。然而该类玄武岩与典型 N 型 MORB 不同之处是 Th 和 Pb 高, 这又与一些大陆溢流玄武岩类似, 恰好反映了该玄武岩是由初始大陆裂谷向成熟洋盆转化阶段的产物。

蛇绿岩及相关火山岩的精细解析表明, 勉略构造带自西至东, 在长达 1500 余公里的范围内断续出露蛇绿岩、洋岛火山岩、岛弧火山岩及初始洋型双峰式火山岩 20 余处, 充分表明秦岭-大别南缘曾存在有现已消失的勉略有限洋盆, 并自西部德尔尼、经勉略、直至大别山南缘分布, 总体属中小有限洋盆, 且地质、地球化学(包括 Pb, Sr, Nd 等同位素示踪)^[10,13] 综合对比分析, 表明属东古特提斯洋域北缘分支洋盆。洋盆在 D-C-T₂ 期间曾经经历过一个有限洋盆发生、发展与消亡过程, 并成为中国大陆印支期完成其主体拼合的主要缝合带。

1.2 古大陆边缘与前陆盆地的重建

勉略洋盆与缝合带的恢复重建, 除上述蛇绿岩等的证据外, 还需要构造沉积学的研究。

秦岭-大别造山带沉积构造演化研究^[8,18,19], 以秦岭为例, 证明秦岭造山带是在元古代基底基础上, 于新元古代晚期, 至少在震旦纪时期, 已沿商丹一线, 出现了分隔华北与扬子的古秦岭商丹洋盆, 南北地质特点与演化显著不同。南秦岭区域从震旦纪至早古生代沉积构造演化

呈现为从早期的扩张陆缘转变为俯冲板块前缘的被动陆缘构造环境,但从泥盆纪开始,在南秦岭的扬子板块北缘的被动陆缘隆起带上,沿现勉略一线,新又逐渐打开形成了秦岭勉略有限洋盆(图 2),出现了秦岭晚古生代至三叠纪的板块构造新格局,形成新的陆缘沉积体系及其之后的现勉略带南侧的前陆盆地(T_3-K_1),客观地记录了勉略洋盆从打开到封闭的演化过程。

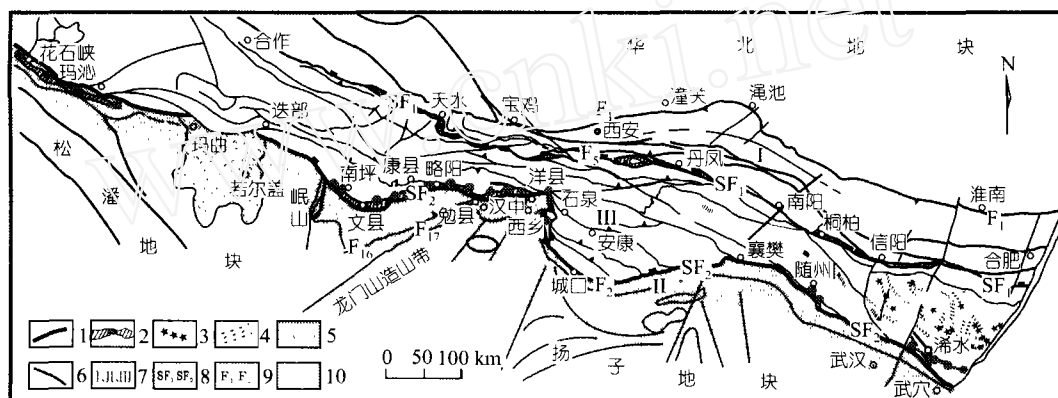


图 2 勉略带南侧陆缘(D-T₂)和前陆盆地(T₃-K₁)图

1. 勉略构造带; 2. 蛇绿岩及相关火山岩; 3. UHP 岩石剥露区; 4. 韧性剪切带; 5. 被动陆缘沉积体系范围; 6. 断层; 7. I 示华北地块南缘与北秦岭带; II 示扬子地块北缘; III 示南秦岭; 8. 秦岭-大别造山带南丹缝合带(SF₁), 秦岭勉略缝合带(SF₂); 9. 秦岭-大别造山带南、北边界断裂; 10. 勉略碰撞带前陆盆地及其沉积范围

1.2.1 勉略带大陆边缘沉积体系 沿现勉略带南侧从西部玛沁至东部大别南缘, 连续发育晚古生代至三叠纪的陆缘沉积体系^[30-32]。根据构造演化与盆地沉积充填特征的系统研究, 陆缘盆地发育演化可划分为 2 个阶段: D-C 从扩张裂谷到初始洋盆演化; P-T₁₋₂ 被动大陆边缘盆地演化。

(1) D-C 扩张裂谷至初始洋盆演化阶段。地层沉积记录表明, 勉略带发生扩张裂解前, 该区在区域上主体处于原扬子板块北缘早古生代被动陆缘后侧的一带隆起背景上, 区域上现勉略带两侧均普遍缺失 D-C 岩层, 但相反勉略带内, 却从西至东普遍发育 D-C 岩层, 并具有裂谷型沉积组合, 反映了扩张裂陷的发生、发展。泥盆系在勉略带内发育从初始裂陷快速粗砾屑堆积、裂谷边缘相冲积扇体系的扇三角洲至深水扇, 到重力流、浊积岩系的由斜坡、坡底裙以致盆地平原相的深水浊积岩系, 并南缘具自南向北加深的相变与组合等, 总体表现了勉略洋盆从初始同裂谷到初始小洋盆的沉积充填特征。而石炭系沉积主要以陆棚-盆地体系为特征, 同时在蛇绿混杂岩中的硅质岩中还发现 C₁ 的放射虫动物群, 表明石炭纪已开始发育深水盆地相沉积^[8]。而且从勉略带南侧晚古生代沉积岩层发育的层位时代及其延展分布, 还揭示当西部 D₁₋₂ 已是裂谷沉积, 并向初始洋盆发展时, 中部(高川)至东部(花山)D₃ 还处在扩张裂陷进程中, 表现在 D₃ 裂谷期充填岩层沉积超覆在 C-O 岩层之上, 因而表明勉略带的扩张打开是自西而东逐渐扩张发展的。

(2) P-T₁₋₂ 被动大陆边缘沉积体系(图 2)。勉略带内及其南侧广泛发育 P-T₁₋₂ 沉积岩系。据其沉积组合、岩相分布与物源流向和构造沉积古地理特征, 并结合同期的勉略蛇绿岩、岛弧火山岩与俯冲型花岗岩等共同一致表明, 勉略洋盆从石炭纪晚期到早中三叠世从西到东逐渐扩张

打开, 形成统一的洋盆, 并于二叠纪中晚期已开始消减俯冲^[8,10,18]。故勉略古洋盆南侧的 $P-T_{1-2}$ 沉积岩系已从 D-C 的扩张裂谷沉积为主演化转入被动陆缘沉积。中上二叠统, 尤其如长兴期沉积, 显著的以浅海-半深海硅质岩为主自南向北的加深, 形成典型的被动大陆边缘沉积体系, 指示其前缘有洋盆的存在。

勉略带南侧的早三叠世自北而南发育下部浅海泥质-灰泥质盆地体系、浅海碳酸盐陆架斜坡体系和碳酸盐岩台地体系, 反映了勉略有限洋盆地体系开始萎缩^[8]。中上扬子北缘巨厚的巴东组(T_2)垂向从细粒向粗粒的沉积演化表明, 自中三叠世开始, 勉略带自东而西已转入早期海相前陆盆地沉积时期, 表示勉略洋盆斜向碰撞封闭具有自东而西的穿时的过程。

1.2.2 勉略俯冲碰撞带南缘的前陆盆地体系 中三叠世后, 勉略带的陆缘盆地已全部转换为前陆盆地, 但因后期勉略带的强烈逆冲推覆, 使原前陆盆地大量沉积体被掩盖或改造破坏, 但依据现残存的沉积记录, 仍可以恢复出发育两套前陆盆地体系, 即 T_{2-3} 海相前陆盆地体系和 J-K₁ 陆相前陆盆地体系。

(1) 勉略带 T_{2-3} 海相前陆盆地沉积体系, T_{2-3} 海相前陆盆地沉积体系分布于中、上扬子地块与松潘等地北缘, 近东西向展布。同期川西龙门山前也发育前陆盆地呈北东向分布, 两者成交接分支关系。松潘北缘 T_{1-2} 安尼期, 仍为勉略洋盆南缘被动陆缘的浅海台地相沉积环境, 但自 T_2 拉丁阶至 T_3 卡尼阶发生明显变化, 出现强烈沉陷充填的细粒浊积岩为主的深水沉积, 呈现半深海-深海斜坡环境, 至 T_3 诺利期又变为浅海陆棚粗中粒长石砂岩等沉积, 代表海相磨拉石相充填, 诺利期后即已发生构造变形而升降。同期的中上扬子北缘地区, 由于强烈构造改造, 勉略带南侧的汉南地块和巴山弧外侧的 T_{2-3} 海相前陆盆地沉积多已被掩覆, 仅在川西北残留有周缘前陆盆地远端的浅水沉积。而在中扬子的湖北京山-南漳一带 T_{1-2} 发育一套硅质岩与细碎屑岩的典型深水相沉积, 但如上述 T_2 巴东组已明显为前陆盆地相沉积, 表明该区已开始向前陆盆地转变。这恰与大别碰撞超高压变质作用主要发生在 245~230 Ma^[20], 即 T_{1-2} 相吻合。总之勉略带南侧从陆缘沉积环境开始穿时的转换为海相前陆盆地, 其中尤以松潘北缘发育保存完好。

(2) 勉略带侏罗纪至早白垩世(J-K₁)陆相前陆盆地沉积体系(图 2)。勉略带南侧发育并完好保存有 J-K₁ 的陆相前陆盆地沉积岩系, 可划分为 J_{1-2} 和 J_3-K_1 两期。 J_{1-2} 沉积在秦岭-大别南缘稳定分布, 厚度巨大, 表现为前陆盆地河流湖泊相的进积型的垂向沉积序列, 而 J_3-K_1 的盆地相分布已自东向西退缩, 以至晚期逐渐退缩到川西北一隅。总体也表现为河流湖泊陆相的进积型的垂向变化序列。但以 K_2 江汉盆地的上叠交切为代表, 标志着勉略带前陆盆地沉积体系演化的结束和转入新的陆内盆山构造演化阶段。

1.3 古俯冲碰撞构造与相关变质、岩浆活动和古缝合带的恢复

根据沿现勉略构造带不同地段残存的原板块俯冲碰撞构造与变质、岩浆作用也同样可以恢复重建勉略古缝合带。主要证据是:

1.3.1 原板块俯冲碰撞构造 经对勉略带中各区段的系统构造解析和面积性大比例尺构造填图, 筛分去除中生代叠加构造, 确定各区段均残存可以对比的原俯冲碰撞构造。其中俯冲构造, 残存于蛇绿混杂岩块和陆缘沉积岩块岩层之中, 以中深层次透入性韧性剪切流变作用与韧性剪切推覆构造为主要特征, 主要表现为仅在不同混杂岩块内普遍发育的早期透入性片理、片麻理($S_1, S_0 \approx S_1$)与矿物线理(L_1)。它们均被筛分确定的碰撞构造面理(S_2)与韧性剪切

带所交切改造, 而碰撞构造主要表现为: (i) 以缝合带中大量构造残片、岩块的剪切推覆叠置和混杂构造与组合为特征, 包括不同中深层次糜棱岩与韧性剪切带等^[11]; (ii) 勉略带南侧, 并行一带从西至东最新只卷入 T_2 的前陆冲断带, 应是勉略缝合带于印支期陆-陆碰撞的直接产物。

1.3.2 碰撞变形变质作用 勉略带内普遍遭受区域变质与动力变质作用, 主要达绿片岩相, 个别区段则达角闪岩相与麻粒岩相, 并在玛沁南、勉略安子山及桐柏-大别南缘断续残存高压蓝片岩带。勉略区段发现低温高压矿物组合(黑硬绿泥石、3T 多硅白云母等)和中温高压矿物组合(钠云母等)。其中安子山有中高压麻粒岩($657\sim 772^\circ\text{C}$, $0.97\sim 1.3\text{ GPa}$)^[21], 并与勉略区段东端北侧的佛坪穹窿麻粒岩时代相近^[22,23]。在勉略、玛沁等区段还发现构造沉积混杂岩带, 以碰撞构造混杂为特点, 并明显保存原沉积混杂特征。以上共同表明它们是同期俯冲碰撞构造产物。

1.3.3 俯冲碰撞型花岗岩带 沿勉略带内及北侧发育系列俯冲碰撞型花岗岩。同位素年代集中于 $220\sim 205\text{ Ma}(\text{U-Pb})$ ^[24], 应是勉略带板块俯冲碰撞的重要证据。

1.4 勉略古洋盆与古缝合带形成时代

以同位素年代学与古生物相结合的定年, 并结合区域地质综合分析, 证明勉略古洋盆与俯冲碰撞缝合带总体形成于晚古生代至中生代初(D-T, $345\sim 200\text{ Ma}\pm$), 而且由于勉略带从扩张打开至最终碰撞造山过程是东、西穿时发展演化的, 故各地段形成时代有差异, 所以 D-T 代表了整个勉略有限洋盆从初始扩张裂陷到最终消亡碰撞造山的总体形成演化时限。

1.4.1 勉略古洋盆启开与发育时代 古生物定年主要证据有: 勉略区段蛇绿岩中硅质岩层内放射虫动物群化石定年为 C_1 ^[25]。西乡孙家河火山岩中硅质岩夹层放射虫定年为 D_3-C_3 ^[26]。康玛区段蛇绿混杂岩中火山岩中硅质岩放射虫属 D_3-C ^[27]。玛沁地区与蛇绿岩及相关火山岩密切共生的硅质岩与相关岩层古生物化石为 C-P 和 T_{1-2} ^[28]。东部花山蛇绿混杂岩块的最新时代由古生物定年为 T_{1-2} , P, C 等(1/5 万区测资料)。上述从东至西千余公里延伸的带内共同具有相同时代的放射虫等古生物化石群落, 并集中于 D- T_{1-2} 时期, 显然是处于同时代同环境下的产物, 因而从陆缘到洋内的沉积岩时代表明了洋盆启开发育的主要时代为 D_3-P 。

同位素年代学证据: 勉略带不同区段蛇绿岩与相关火山岩、花岗岩等采用多种同位素测年方法, 获得时代集中于 $345\sim 200\text{ Ma}\pm$, 即 D-T。如玛沁德尔尼蛇绿岩洋脊玄武岩的全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄($345\pm 7.9\text{ Ma}$, 等时年龄为($320.4\pm 20.2\text{ Ma}$)^[29], 与其中硅质岩夹层的放射虫定年 D_2-C 相一致。勉略区段蛇绿混杂岩中与基性火山岩共生的斜长花岗岩的结晶锆石 U-Pb 年龄为($300\pm 81\text{ Ma}$), 而其继承锆石年龄为($913\pm 40\text{ Ma}$)^[30]。同地与基性火山岩互层的硅质岩获 $326\text{ Ma}(\text{Sm-Nd 全岩等时限})$ 和 $344\text{ Ma}(\text{Rb-Sr, 张宗清, 待刊})$, 并与产于其中的放射虫化石时代 D_3-C_1 ^[25]相吻合。勉略庄科蛇绿岩变质基性火山岩 Rb-Sr 等时年龄($286\pm 110\text{ Ma}$)和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄($283\pm 22\text{ Ma}$ (张宗清, 待刊)), 结合地质综合分析应代表洋壳的初始俯冲变质年龄。

综合上述古生物与同位素年代表明勉略古洋盆打开与扩张发育主要在 $D_{2-3}-P_1$ 时期。

1.4.2 勉略古洋壳俯冲与碰撞造山缝合带形成时代 除上述张宗清获得的勉略庄科、三岔子基性火山岩等年龄外, 蛇绿岩混杂岩带不同地点还获得变质基性火山岩($242\pm 21\text{ Ma}(\text{Sm-Nd})$, ($221\pm 13\text{ Ma}(\text{Rb-Sr})$)^[15], ($226.9\pm 0.9\text{ Ma}$)~($219.5\pm 1.4\text{ Ma}$)^($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)^[31], 勉略带北侧系列俯冲碰撞型花岗岩体 U-Pb 年龄 $225\sim 205\text{ Ma}$ ^[24]。尤其勉略带内安子山准高压基性麻粒岩

(蛇绿岩组成部分)^[21]Sm-Nd 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 199~192 Ma^[22], 并与勉略区段东端北侧的佛坪穹窿麻粒岩的 U-Pb 锆石年龄(212.8 ± 9.4) Ma^[22,23]相一致。麻粒岩年龄应是俯冲洋壳在深部准高压麻粒岩化后又随碰撞而隆升的时代。因此上述同位素年代集中代表了勉略古洋壳俯冲碰撞和缝合带形成时代($P_2-T_{2,3}$)。事实上, 前述勉略带南侧并行的最新只卷入 T_2 岩层的前陆冲断褶皱带, 也一致地证明了勉略古缝合带是在 $T_{2,3}$ 时期形成的。

勉略蛇绿岩混杂带内, 还获得有 10~8 亿年及 4 亿年的岩石同位素年龄, 综合分析鉴于带内混杂多量不同构造岩块, 加之同位素年龄测试方法与解释的复杂性, 关于勉略古洋盆和碰撞缝合带的形成时代, 我们以与洋盆发育直接相关, 产于蛇绿岩内与火山岩或岛弧火山岩呈互层的硅质岩的古生物为主要依据, 并结合不同岩类的同位素年龄, 综合区域地质分析, 判定与确定认为勉略洋盆开启、发育时代为 $D_{2,3}-P_1$, 俯冲消减与碰撞造山为 $P_2-T_{2,3}$, 总体时限为 $D_2-T_{2,3}$ (345~200 Ma $\pm$), T_3 及其之后已转入后造山板内(陆内)构造演化时期。

2 勉略构造带现今构造几何学与运动学

现今勉略构造带是在上述勉略板块碰撞构造与缝合带基础上, 又经历中生代陆内构造迭加复合改造而综合形成, 成为中国大陆构造中突出而重要的构造带。其构造几何学与运动学具有独特特征。

2.1 勉略带构造几何学结构

勉略带现沿秦岭-大别造山带南缘边界呈 EW-NWW 向延伸, 区域上即是秦岭-大别等中央造山系南缘的边界断裂构造带。其最突出的构造特征是: 它总体以秦岭-大别南缘边界断裂为主推覆断层, 由系列弧形指向南的逆冲推覆构造连接组合, 构成中央造山系南部迭覆于扬子地块北缘的巨大陆内推覆构造带。其构造几何学结构具以下主要特点。

(1) 平面构造几何学呈线性弧形波状延伸, 东西向横穿中国大陆中部, 以它为界南北构成巨大构造交错, 成为划分中国大陆构造南北的重要构造界线。

勉略带以系列连续交接的指向南的大型弧形逆冲推覆构造近东西向延展为特色, 其中以大别、巴山、康玛三大指向南的弧形逆冲推覆构造为主, 其间相对于扬子地块北缘黄陵、汉南-碧口和若尔盖地块的阻挡而呈向北突出的弧形, 总体呈现为正弦波状的线性平面展布(图 1)。勉略带包括以下主要弧形推覆构造。

东端大别弧由于郯庐断裂平移, 东翼移至鲁东, 而西翼呈半弧状, 即武穴-襄樊间的桐柏-大别造山带南缘襄广段的向 S-SW 的斜向逆冲推覆构造, 兼具右行走滑, 并伴随郯庐的左行剪切平移, 总体造成其大幅度逆冲推覆于中扬子地块北缘。该区段晚近期多为新生界覆盖, 但横穿大别的反射地震测深揭示了上述向南的巨大逆冲推覆的深部结构^[6,32]。襄广段西延绕黄陵-神农架地块北侧接巴山弧形构造。

巴山逆冲推覆构造介于襄樊、洋县间, 呈巨大指向 SSW 的不对称弧形, 东翼长, 西翼短呈近 SN-NNW 向, 其间的南秦岭印支期勉略带碰撞造山中形成的安康碰撞推覆构造与武当穹隆构造, 在中新生代秦岭陆内造山过程中, 又发生大规模向南的推覆, 并由于东、西侧黄陵与汉南地块不均一阻挡而形成向 SSW 偏移的不对称弧形大巴山逆冲推覆构造(图 1, 3), 成为勉略构造带, 乃至秦岭和中国大陆构造中突出而重要的大陆推覆构造。

勉略区段是巴山弧形构造的西延, 介于洋县-康县间, 呈东西向, 西接康玛弧形构造, 是

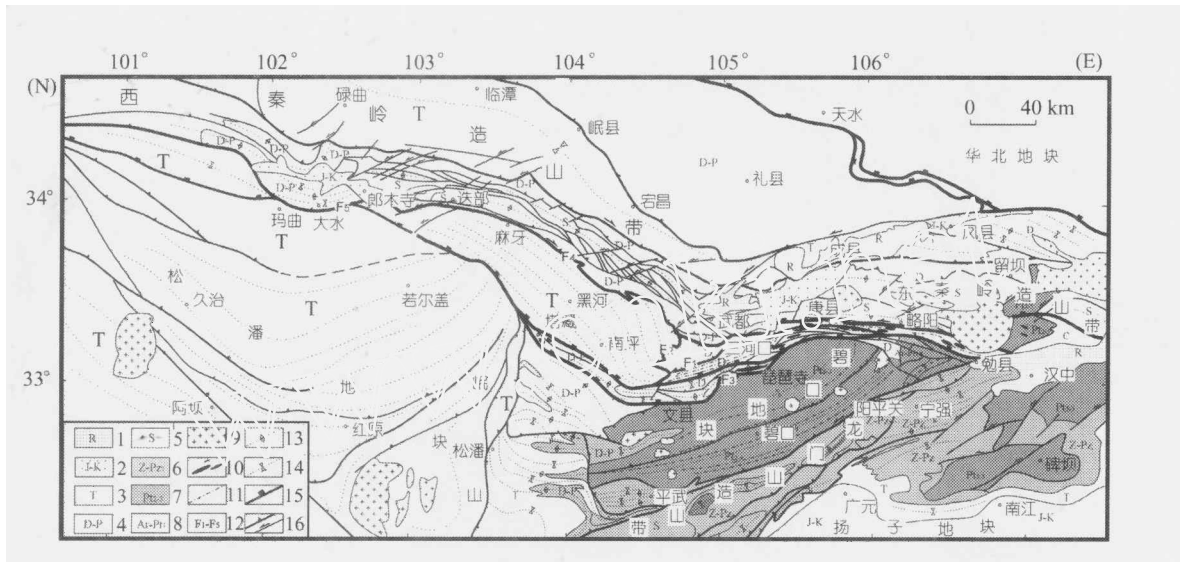


图 4 康玛弧形逆冲推覆构造图

1. 新生界; 2. 侏罗-白垩系; 3. 三叠系; 4. 二叠系-泥盆系; 5. 志留系; 6. 震旦系-古生界; 7. 中上元古界; 8. 太古-古元古代变质杂岩基底; 9. 印支期花岗岩; 10. 蛇绿岩及相关火山岩等; 11. 韧性剪切带; 12. 主推覆断层, F_1 示缝合带主断层; 13. 不同岩层中的背斜; 14. 不同岩层中的向斜; 15. 缝合带; 16. 逆冲断层和走滑断层

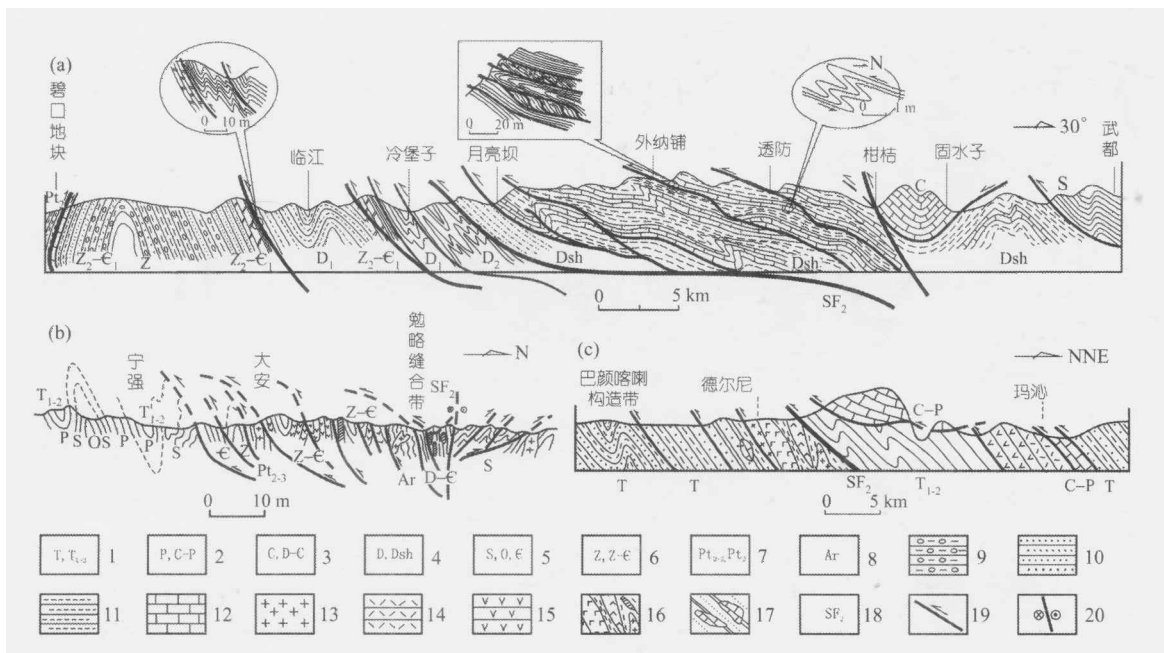


图 5 勉略构造带构造剖面图

(a) 康玛推覆构造剖面; (b) 勉略段构造剖面; (c) 玛沁逆冲推覆构造剖面。1. 三叠系、中下三叠统; 2. 二叠系、石炭-二叠系; 3. 石炭系、泥盆-石炭系; 4. 泥盆系二河口群、泥盆系; 5. 志留系、奥陶系、寒武系; 6. 震旦系、震旦-寒武系; 7. 中新元古界、中元古界; 8. 太古界; 9. 变质砾岩; 10. 变质砂岩等; 11. 变质泥岩类; 12. 灰岩、变质灰岩; 13. 花岗岩; 14. 中性火山岩; 15. 基性火山岩; 16. 蛇绿岩和蛇绿混杂岩; 17. 沉积构造混杂岩; 18. 勉略断裂带与勉略缝合带; 19. 逆冲推覆断层、韧性剪切带; 20. 走滑断层

包括有以大别 UHP 岩石抬出为特征的造山带根部深层岩块向南大幅度推覆叠置的襄广段巨大深层推覆构造。还有以巴山和康玛弧形构造为例的不同多层次多级别的逆冲推覆构造。如巴山弧形构造(图 3), 在先期碰撞构造和缝合带基础上, 时空复合形成大巴山巨大弧形双层逆冲推覆构造。它以洋县-石泉-城口-房县巴山主推覆断层为界, 分为南北两个推覆构造, 两者现虽为同一推覆构造系, 但差异明显。北大巴山推覆构造由南秦岭下古生界为主包容中上元古界总体围绕武当地块西南侧, 组成一系列 NW-SE 平行延伸指向 SW 的逆冲推覆构造, 主体为秦岭印支主造山期板块碰撞构造, 原应不属巴山推覆构造, 但后期又被卷入, 首先它整体作为弧形推覆体, 沿主推覆断层向 SSW 大规模推覆运动, 并且其东西端被截切。同时内部先期断裂也随之逆冲活动, 以致出现逆冲推覆在断陷盆地 J_{1-2} 岩层之上。南大巴山则由两个次级构造单元组成: (i) 迭加复合逆冲推覆带, 位于上述巴山主推覆断层南侧, 并部分被掩覆。它是在先期最新只卷入 T_2 岩层的勉略带碰撞构造基础上, 又迭加由北大巴山推覆而引起的复合推覆变形, 故形成为迭加复合逆冲推覆构造。而且依据如图 3 所示, 巴山主推覆断层东、西端的西乡高川和竹山甘沟遥相对应的先期碰撞构造与后期迭加变形, 清楚反映巴山弧形构造大规模推覆掩盖了两者之间的相应构造, 乃至掩覆了先期的勉略古缝合带, 该区现有的地球物理测深也证明了这一点(图 6)。(ii) 推覆扩展前锋变形带, 它是由上述大巴山推覆构造所引起的前沿卷入 T_3-K 前陆盆地沉积的推覆向前扩展的变形带。总之, 上述表明巴山弧形构造是由先期板块碰撞构造和后期陆内推覆构造复合迭加, 由南、大巴山推覆构造组成为巨大指向 SSW 的弧形双层几何学结构的逆冲推覆构造。而与之不同, 康玛弧形构造几何学结构则是组成与结构更为复杂的一个多层次的指向南的巨大弧形逆冲推覆构造系。它由 3 个次级单元组成(图 4): (i) 在原先期碰撞推覆构造基础上的北部三河口低角度逆掩推覆构造, 以 F_1 为主推覆断层; (ii) 西部南坪黑河薄皮滑脱逆冲推覆构造, F_2 为主推覆断层, 呈低角度交切或顺层推覆, 逆掩叠覆或截切三河口逆掩推覆和其它构造之上, 具薄皮构造特点; (iii) 晚期统一整体的康玛巨型弧形推覆构造, 以西秦岭南缘边界为主推覆断层(F_3)整体发生向南的逆冲推覆运动, 截切先期与前期构造与松潘、碧口等南侧所有构造线, 并在碧口地块北侧由于碧口基底高位抬出阻挡而发生上部反对冲构造(图 5(a))。勉略带西延连结西秦岭与东昆仑南缘的玛沁推覆构造的结构又呈现为多级组合的迭瓦状逆冲推覆构造, 并以残存较好的印支期蛇绿混杂岩和碰撞推覆与陆内叠加推覆的复合构造为主要特点(图 5)。

显然以上表明勉略带在不同地段不同岩石介质材料与构造边界条件下, 形成了不同结构的构造几何学样式, 但它们又总体在大致同期统一构造动力学背景下形成为统一的勉略构造带, 使之构造几何学结构形态统一而又复杂多样。

(3) 勉略带现今三维几何学模型, 综合上述地表平面展布与剖面结构, 并结合穿越大别、东、西秦岭的现有不同地球物理测深资料^[6,32,33](图 6), 显然呈现为秦岭-大别等中央造山系的造山带陆壳, 沿其南缘边界在先期俯冲碰撞深达地幔的缝合带构造基础上, 以多种不同类型的地壳规模的逆冲推覆构造型式, 形成造山带地壳物质大规模叠覆于相邻克拉通地块之上的大陆地壳收缩多重推覆叠置空间弧形展布的三维几何学模型。

2.2 勉略带构造运动学特征

根据区域构造和勉略带的构造几何学分析, 勉略带形成具有以下主要构造运动学特征:

(1) 总体反映造山带与其相邻地块间的相互作用, 于先期板块碰撞造山之后, 在陆内构造

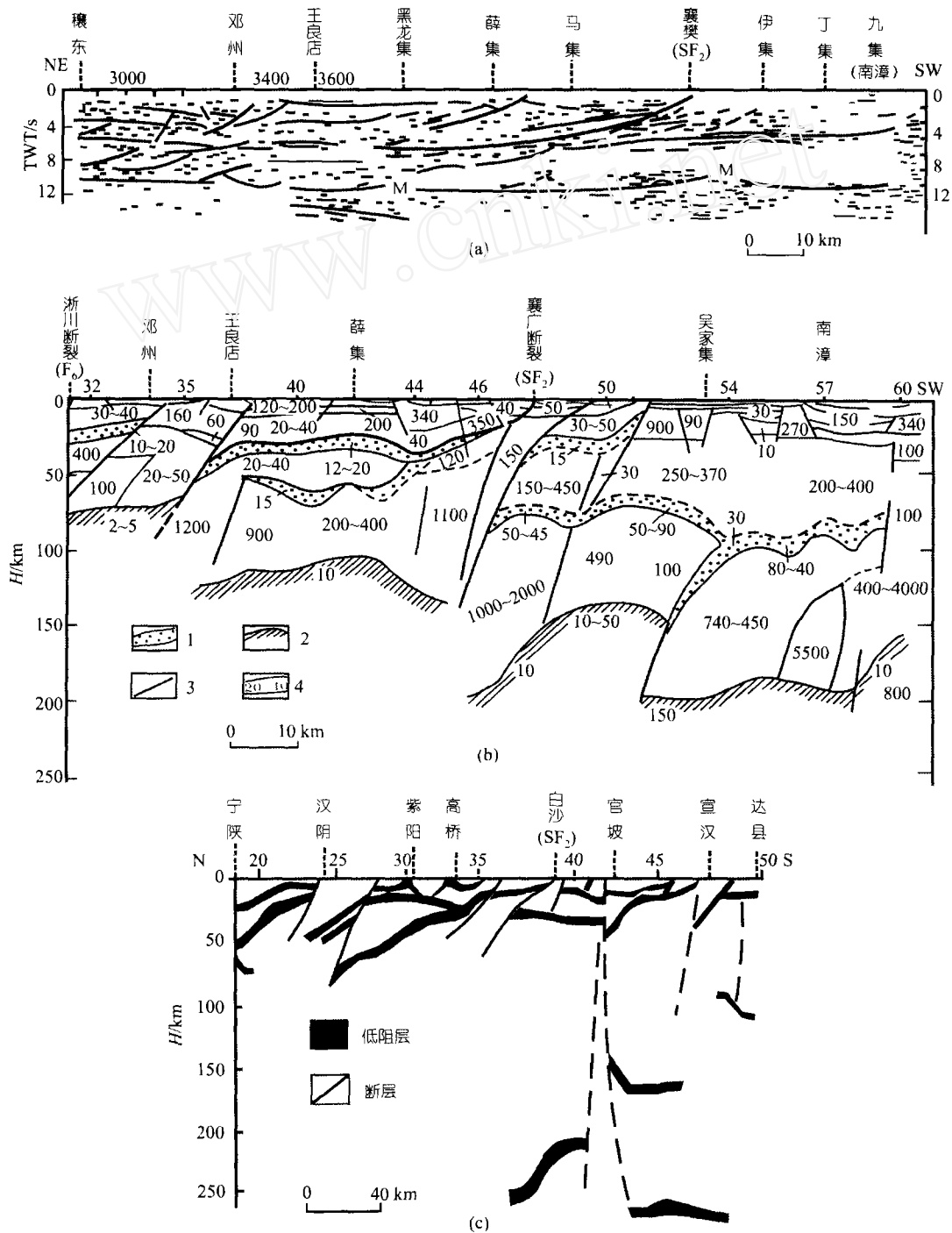


图 6 秦岭造山带反射地震和大地电磁测深剖面图(据袁学诚, 李立, 1997)

(a) 秦岭洛阳-南漳反射地震测深剖面(穰东-南漳段); (b) 秦岭洛阳-南漳大地电磁测深剖面(浙川-南漳段); (c) 秦岭宁陕-达县大地电磁测深剖面。1. 低阻层; 2. 岩石圈底界面; 3. 推测断层; 4. 电阻率; SF₂ 示勉略构造带与勉略古缝合带

演化中,其间又沿两者破裂边界发生克拉通地块向造山带之下作大规模陆内俯冲运动,而造山带则向外产生大幅度反向逆冲推覆运动,形成陆壳物质,乃至壳幔物质双向收缩叠覆,勉略带构造反映了这种在区域地幔动力学背景下发生的陆内盆地壳尺度的构造运动。

(2) 勉略带具有东、西部大尺度差异的俯冲与推覆运动,东部大别的超高压岩石的形成与折返,除其北缘的大陆深俯冲与逆冲折返作用外,新的反射地震测深已揭示,南缘也存在巨大深俯冲与大别深层岩块的折返抬升,即表明勉略带东部相对其西部发生巨大差异的逆冲推覆运动^[30,33],也即表明扬子地块相对秦岭-大别造山带发生陆内巨大逆时针旋转的斜向俯冲和造山带相对顺时针旋转的逆冲推覆运动,致使东部大别 UHP 深层岩块得以快速抬升剥露,故反映勉略带具有东、西部非均一差异俯冲与推覆运动特征。

(3) 勉略带的弧形波状展布,表示因其两侧不同地段岩石介质材料与构造边界条件的差异,尤其南侧扬子地块北缘不同构造单元古老基底地块的阻挡作用,使造山带地壳向南逆冲推覆过程中产生非均一差异运动,造成一系列运动幅度不同的多样弧形推覆构造,故又揭示了勉略带各地段间存在显著差异推覆运动,并由之造成了多样组合的推覆构造几何学样式。

3 勉略构造带的形成演化及其中国大陆构造动力学意义

3.1 勉略构造带的形成演化

综合概括中央造山系南缘的勉略构造带的形成演化过程与历史,显然它作为秦岭造山带等中央造山系的主要组成部分,是在整个中央造山系晚古生代以来新的板块构造格局与陆内造山演化中而发展演化的,但就其自身而言,主要包括两大时期:(i) 勉略有限洋盆在先期构造基础上扩张打开到最后碰撞造山缝合带形成的演化(D_{2-3} - T_{2-3});(ii) 中生代后造山陆内构造演化,综合厘定其具体形成演化过程概括为以下 6 个阶段(图 7)。

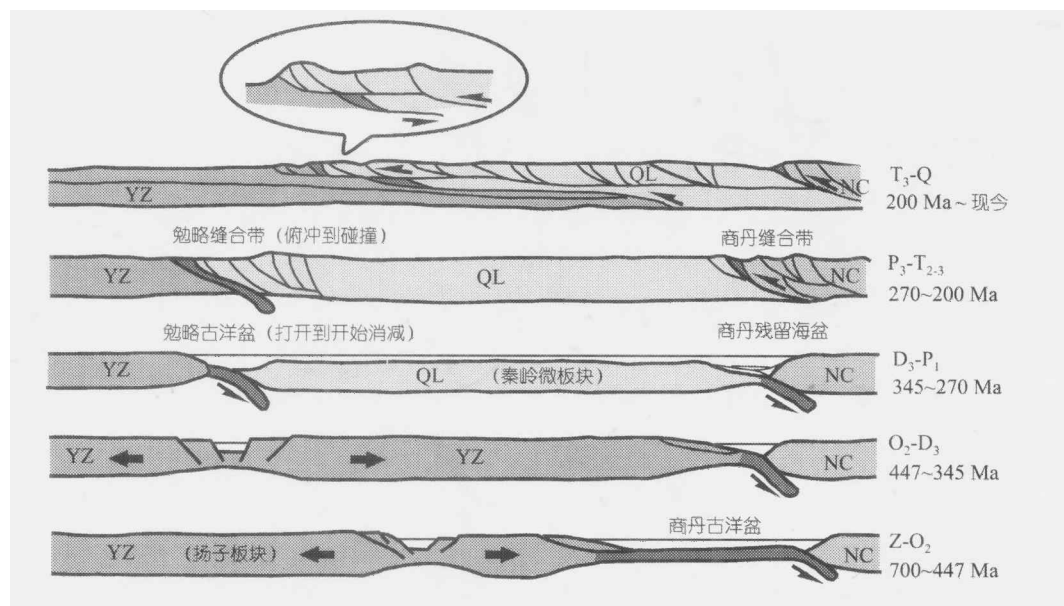


图 7 勉略构造带演化简图

(1) 初始扩张裂陷-初始洋盆打开阶段($D_{2-3}-C_1$). 在东古特提斯洋盆扩张打开的区域构造动力学背景下, 在秦岭等中央造山系原扬子板块北缘被动大陆边缘的扩张隆起带基础上, 沿勉略带一线自西而东发生扩张裂陷, 并发展转化为初始洋盆($D_{2-3}-C_1$).

(2) 小洋盆-有限洋盆扩张发育阶段(C_1-P_1). 从初始洋盆处于非统一贯通的串珠状多个小洋盆逐渐自西而东发展演化, 至早石炭世可能已形成贯通东西的统一勉略古有限洋盆.

(3) 洋壳板块消减俯冲演化阶段(P_2-T_2). 岛弧火山岩、俯冲花岗岩以及俯冲变质变形作用揭示晚二叠世(P_2)勉略有限洋盆已开始收缩, 洋壳消减俯冲, 出现岛弧岩浆和弧扩张与弧裂陷的演化特征.

(4) 陆-陆碰撞造山阶段(T_{2-3}). 蛇绿混杂岩带、碰撞变质变形构造、碰撞岩浆活动和最新只卷入 T_2 的前陆冲断褶皱带形成, 以及双变质和深层麻粒岩的抬出等共同证明在 T_{2-3} 时期勉略带已发展到陆-陆碰撞造山阶段.

(5) 晚造山逆冲推覆与前陆盆地和带内伸展塌陷演化阶段(T_3-J_{1-2}). 伴随碰撞造山演化, 在晚期由于造山隆升, 尤其沿勉略缝合带南侧的巨大碰撞逆冲推覆和前陆冲断褶皱作用, 产生了前陆断褶带前缘的前陆盆地(T_3-J_{1-2}), 而在勉略带内隆升地区则发生伸展塌陷作用, 形成诸如带内的勉县、青峰等一系列 J_{1-2} 断陷盆地.

(6) 后造山陆内构造演化阶段(J_2-Q). 综合分析可划分为: (i) J_2-K_1 以复合叠加巨大逆冲推覆构造为基本特征的陆内推覆构造阶段. 勉略带的巴山、康玛、大别南缘等系列巨型弧形推覆构造此时最终定型, 强烈叠加改造勉略古缝合带; (ii) K_2 以来新的陆内构造叠加复合演化阶段. 伴随秦岭-大别中央造山系整体的急剧隆升, 又发生新的伸展裂陷与挤压推覆, 复合叠加终成现今勉略构造带的面貌.

3.2 勉略构造带对中国大陆构造及其动力学意义

综合勉略带的组成与构造几何学、运动学及其先期板块构造缝合带的形成演化, 突出表明, 它对中国大陆的统一形成演化及其动力学具有特殊的意义, 可以概括为以下 3 方面.

(1) 它是现今中国大陆构造中, 突出的分隔中国大陆地质南北、横贯东西的巨型大陆推覆构造和陆内强构造变形带, 在中国大陆现今组成与结构中占有突出显著地位. 赋存有中生代中国大陆构造南、北陆内构造演化、青藏高原隆升, 大陆东、西构造反转变性、大别 UHP 岩石形成与剥露及其深部地幔动力学演变等^[20,34~36]的特有信息与记录, 是研究中国及东亚大陆构造的重要地带.

(2) 它是东古特提斯构造域的北缘带, 是中国大陆印支期完成主体拼合的主要构造结合带, 是古亚洲与东古特提斯两构造体系域衔接转换区^[37,38]. 虽三江地区是东古特提斯主洋盆与主拼合带^[39], 但其在中国大陆构造中已偏于一隅, 而中央造山系南缘的勉略带则恰位于中国大陆中央南北主体拼合带上, 故在中国大陆的形成演化中占有特殊位置, 是探索中国大陆在全球构造背景下, 如何最后完成其主体拼合、过程及其动力学和不同构造动力学体系域交接转换关系的良好场所.

(3) 勉略古洋盆的扩张打开与封闭, 结合同期区域构造背景, 诸如东古特提斯的区域打开、扬子西部攀西裂谷的形成($D-P$)^[40]、峨嵋大陆玄武岩的广泛喷发(P_2)^[41]、上扬子板内的扩张裂陷等, 共同一致反映同期发生了广泛区域性的扩张裂解, 应具有统一深部背景, 可能揭示晚古生代扬子及邻区, 即东古特提斯区域存在深部地幔柱构造作用的统一区域地幔动力学背

景^[42~46], 应是探讨研究中国大陆构造演化动力学, 东古特提斯打开与演化和印支期中国现今大陆主体拼接形成及其机制与动力学, 探索大陆动力学的难得天然实验室与研究基地。

参 考 文 献

- 1 李春昱, 刘仰文, 朱宝清, 等. 秦岭及祁连山构造发展史. 国际交流地质论文集(一). 北京: 地质出版社, 1978. 174~185
- 2 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1992. 1~190
- 3 蔡学林, 吴德超, 石绍清, 等. 武当山推覆构造的形成与演化. 成都: 成都科技大学出版社, 1995. 22~32
- 4 何建坤, 卢华复, 张庆龙, 等. 南大巴山冲断构造及其剪切挤压动力学机制. 高校地质学报, 1997, 3(4): 419~427
- 5 索书田, 桑隆勋, 韩郁菁, 等. 大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学. 北京: 中国地质大学出版社, 1993. 1~259
- 6 董树文, 吴宜志, 高 锐, 等. 大别造山带地壳速度结构与动力学. 地球物理学报, 1998, 41(3): 349~361
- 7 张国伟, 孟庆任, 赖少聪. 秦岭造山带的结构与构造. 中国科学, B 辑, 1995, 25(9): 994~1003
- 8 Liu Shaofeng, Zhang Guowei. Process of Rifting and Collision along Plate Margins of the Qinling Orogenic Belt and Its Geodynamics. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(3): 275~287
- 9 姜春发, 王宗起, 李锦铁. 中央造山带开合构造. 北京: 地质出版社, 2000. 1~153
- 10 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001. 1~855
- 11 陈 亮, 孙 勇, 柳小明, 等. 青海省德尔尼蛇绿岩的地球化学特征及其大地构造意义. 岩石学报, 2000, 16(1): 106~110
- 12 赖绍聪, 张国伟, 杨永成, 等. 南秦岭勉县-略阳结合带变质火山岩岩石地球化学特征. 岩石学报, 1997, 13(4): 563~573
- 13 许继锋, 韩吟文. 秦岭古 MORB 型岩石的高放射性成因铅同位素组成特提斯型古洋幔存在的证据. 中国科学, D 辑, 1996, 26(增刊): 34~41
- 14 董云鹏, 张国伟, 赖绍聪, 等. 随州花山蛇绿构造混杂岩的厘定及其大地构造意义. 中国科学, D 辑, 1999, 29(3): 222~231
- 15 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 等. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学古生代洋盆及其闭合时代的证据. 中国科学, D 辑, 1996, 26(3): 223~230
- 16 赖绍聪, 张国伟, 董云鹏, 等. 秦岭一大别勉略构造带蛇绿岩与相关火山岩性质及其时空分布. 中国科学, D 辑, 2003, 33(12): 1174~1183
- 17 董云鹏, 张国伟, 赵霞, 等. 鄂北大洪山岩浆带的地球化学及其构造意义——南秦岭勉略洋盆东延及其俯冲的新证据. 中国科学, D 辑, 2003, 33(12): 1143~1153
- 18 Meng Qingren, Zhang Guowei. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. Geology, 1999, 27(2): 123~126
- 19 李锦铁. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式——长江中下游地区震旦纪-侏罗纪沉积环境的演变. 地质学报, 2001, 75(1): 25~34
- 20 李曙光. 大陆俯冲化学地球动力学. 地学前缘, 1998, 5(4): 211~234
- 21 李三忠, 张国伟, 李亚林, 等. 勉县地区勉略带内麻粒岩的发现及构造意义. 岩石学报, 2000, 16(2): 220~226
- 22 张宗清, 张国伟, 唐素寒, 等. 秦岭勉略带中安子山麻粒岩的年龄. 科学通报, 2002, 47(22): 1751~1755
- 23 杨崇辉, 魏春景, 张寿广, 等. 南秦岭佛坪地区麻粒岩相岩石锆石 U-Pb 年龄. 地质论评, 1999, 45(2): 173~179
- 24 孙卫东, 李曙光, Yadong Chen, 等. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 地球化学, 2000, 29(3): 209~216
- 25 冯庆来, 杜远生, 殷鸿福, 等. 南秦岭勉略蛇绿混杂岩带中放射虫的发现及其意义. 中国科学, D 辑, 1996, 26(增刊): 78~82
- 26 王宗起, 陈海泓, 李继亮, 等. 南秦岭西乡群放射虫化石的发现及其地质意义. 中国科学, D 辑, 1999, 29(1): 38~44
- 27 赖旭龙, 扬逢清. 四川南坪隆康、塔藏一带泥盆纪含火山岩地层的发现及意义. 科学通报, 1995, 40(9): 863~864
- 28 边千韬, 罗小全, 李涤微. 青海省阿尼玛卿带布青山蛇绿混杂岩的地球化学性质及形成环境. 地质学报, 2001, 75(1): 45~55
- 29 陈 亮, 孙 勇, 裴先治, 等. 德尔尼蛇绿岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄: 青藏最北端古特提斯洋盆存在和延展的证据. 科学通报, 2001, 46(5): 424~426

- 30 李曙光, 侯振辉, 杨永成, 等. 南秦岭勉略构造带三岔子古岩浆弧的地球化学特征及形成时代. 中国科学, D 辑, 2003, 33(12): 1163~1173
- 31 Li Jinyi, Wang Zongqi, Zhao Min. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronological constraints on the timing of collisional orogeny in the Mian-Lue collision belt, southern Qinling Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(2): 208~215
- 32 杨文采. 东大别超高压变质带的深部构造. 中国科学, D 辑, 2003, 33(2): 183~192
- 33 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型. 中国科学, D 辑, 1996, 26(3): 209~215
- 34 Chemenda A I, J-P Burg, M Mattauer. Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: geopoem based on new modeling, geological and geophysical data. *Earth and planetary Sci Lett*, 2000, 174: 397~409
- 35 索书田, 钟增球, 游振东. 大别地块超高压变质期后伸展变形及超高压变质岩折返过程. 中国科学, D 辑, 2000, 30(1): 9~17
- 36 Faure M, Lin W, Shu L, et al. Tectonics of the Dabieshan (eastern China) and possible exhumation mechanism of ultra-high pressure rocks. *Terra Nova*, 1999, 11: 251~258
- 37 Okay A I, Sengor A M C. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology*, 1992, 20: 411~414
- 38 Sengor A M C. Plate Tectonics and Orogenic Research after 25 Years: A Tethyan perspective. *Earth Science Reviews*, 1990, 27: 1~201
- 39 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1998. 1~231
- 40 从柏林. 攀西古裂谷的形成与演化. 北京: 科学出版社, 1988. 1~424
- 41 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件. 地球化学, 2001, 30(1): 1~9
- 42 Davies G F. Mantle plumes, mantle stirring and hotspot chemistry. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 99: 94~109
- 43 Hawkesworth C J, Gallagher K. Mantle hotspots, plumes and regional tectonics as causes of intraplate magmatism. *Terra Nova*, 1993, 5: 552~559
- 44 Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinctions. *Earth Science Reviews*, 2001, 53: 1~33
- 45 Zhao D P. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 192: 251~265
- 46 Condie K C. Episodic continental growth models: afterthoughts and extensions. *Tectonophysics*, 2000, 322: 153~162